

УДК 629.017

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН МЕТОДОМ ПАРЦИАЛЬНЫХ УСКОРЕНИЙ

Подригало М.А., д.т.н.,

Полянский А.С., д.т.н.,

Клец Д.М., к.т.н.

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,*

Корчан Н.С., к.юр.н

*Институт судебно-медицинской экспертизы им. Бокариуса,*

Задорожня В.В., инж.

*Харьковский национальный технический университет*

*сельского хозяйства им. П. Василенко*

Тел. (0619) 42-04-42

**Аннотация** – в статье рассмотрены задачи сохранения устойчивости колесной машины с использованием метода парциальных ускорений.

**Ключевые слова** – колесная машина, устойчивость, ускорение.

*Постановка проблемы.* Устойчивость положения колесных машин (или устойчивость против опрокидывания) является одним из свойств комплексного эксплуатационного свойства автомобилей и тракторов – устойчивости.

Сохранение устойчивости положения колесных машин является одним из самых важных направлений обеспечения безопасности движения автомобилей и охраны труда при работе на тракторах.

В настоящей статье с использованием нового метода парциальных ускорений в общем виде определены условия сохранения колесной машиной устойчивости положения.

*Анализ последних исследований.* Неустойчивость колесных машин является одной из наиболее распространенных причин аварий на дорогах. Устойчивость положения машины может рассматриваться относительно двух осей на опорной плоскости – продольной и поперечной[1]. Устойчивость относительно поперечной оси называют продольной устойчивостью, поскольку опрокидывание может происходить в продольной плоскости.

Устойчивость относительно продольной оси – поперечной устойчивостью, поскольку возможное опрокидывание происходит в поперечной плоскости. Различают статическую и динамическую устойчивость машин. Под статической устойчивостью понимают устойчивость в статическом состоянии (т.е. при отсутствии возмущенного движения), а под динамической устойчивостью – устойчивость в процессе движения и появление возмущенного движения [2].

Движение любой механической системы может быть невозмущенным и возмущенным [3]. Невозмущенным называется некоторое вполне определенное движение системы, подлежащее исследованию. Невозмущенному движению системы отвечает определенное частное решение дифференциальных уравнений, удовлетворяющее начальным условиям при моменте времени  $t=t_0$ . Движение системы, отвечающее измененным начальным условиям, называется возмущенным движением, а приращение переменных – возмущением.

Математическую основу исследований в области устойчивости движения составляет теория устойчивости А.М. Ляпунова [4]. Движение неустойчиво по Ляпунову в случае, когда с течением времени отклонения растут и разница между возмущенным и невозмущенным движениями увеличивается [4]. Общая теория устойчивости движения предусматривает изучение движения на координатной полуоси  $0 \leq t \leq \infty$ . При этом предполагается, что возмущающее воздействие на механическую систему прекратилось при  $t \leq 0$ . Реальные технические процессы протекают на определенном отрезке времени, поэтому наряду с устойчивостью по Ляпунову важное значение имеет техническая устойчивость.

В этом случае рассматривается движение на конечном отрезке времени  $0 \leq t \leq T$ , причем материальная система, может испытывать внешнее возмущающее воздействие на всем отрезке  $0 \leq t \leq T$  или на его части. Если возмущающее воздействие не прекращается при  $t \leq 0$ , то более общим является следующее определение устойчивости движения: «Движение механической системы устойчиво, если при действии ограниченных возмущений отклонения от невозмущенного движения остаются ограниченными».

Понятие устойчивости применительно к автомобилям и тракторам в настоящее время не получило четкого общепринятого определения и в трактовке различных авторов формулируется по разному.

*Цель и постановка задач исследования.* Целью исследования является повышение безопасности движения путем обеспечения устойчивости положения колесных машин.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить и классифицировать внешние возмущения, приводящие к потере устойчивости положения колесных машин;
- провести оценку поперечной устойчивости колесных машин с использованием метода парциальных ускорений.

*Определение внешних возмущений.* Оценка устойчивости положения колесных машин рассмотрим на примере оценки поперечной устойчивости, однако многие положения могут быть справедливы и для оценки продольной устойчивости.

В работе [3] возмущенным движением называется движение, отвечающее измененным начальным условиям, а приращение переменных – возмущениями. При анализе устойчивости, в том числе и положения, необходимо определить и классифицировать возмущения, приводящие к появлению возмущенного движения колесной машины в процессе опрокидывания.

В теории автоматического управления [5] под возмущающим действием (помехой) понимается действие, приложенное к какому-нибудь приспособлению системы, которое нарушает выполнение заданного алгоритма функционирования. Под внутренним возмущением [5] понимается действия, которыми отдельные элементы системы обмениваются между собою.

На наш взгляд возмущения в механической системе могут быть кинематическими, динамическим (силовыми) и энергетическими изменениями параметров.

К кинематическим возмущениям (линейным и угловым) относятся отклонения перемещений, скоростей и ускорений от заданных значений.

К силовым (динамическим) возмущениям относятся непредвиденное действие дополнительных сил и моментов или случайные отклонения значений действующих сил и моментов от заданных значений.

К энергетическим возмущениям можно отнести незапланированные энергетические воздействия, измеряемые в единицах энергии (работы) или мощности.

Рассмотрим движение колесной машины на поперечном уклоне (рис.1).

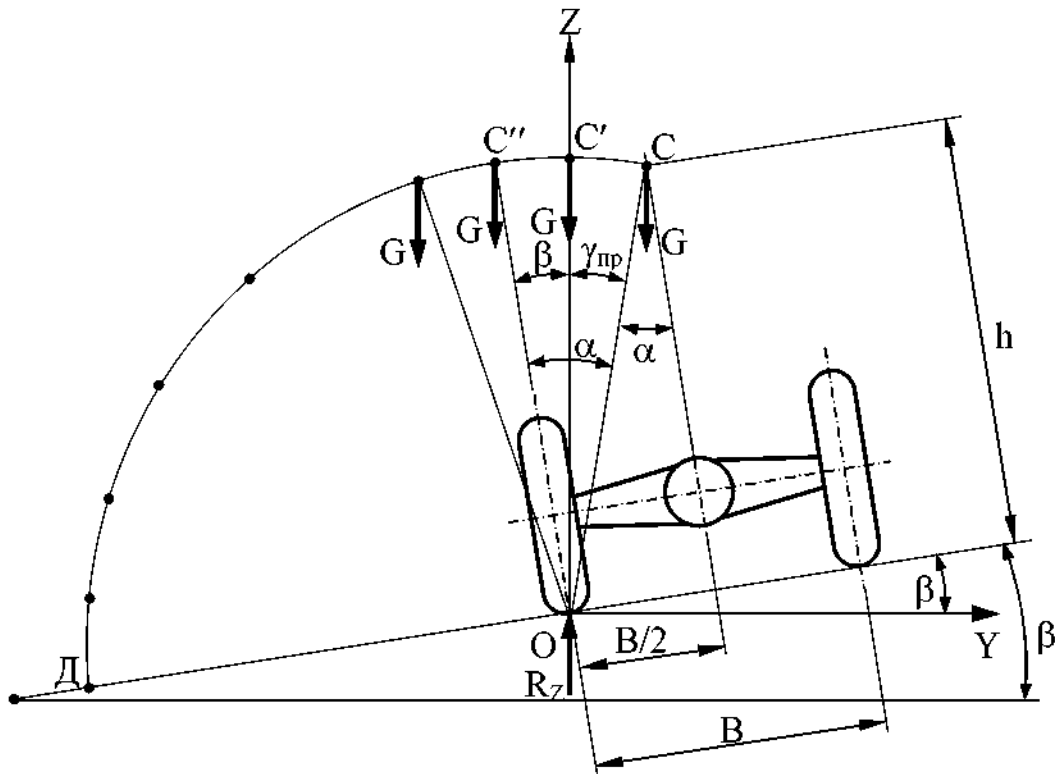


Рис 1. Расчетная схема для оценки поперечной устойчивости положения колесных машин

Условия бокового опрокидывания машины является поворот остова машины в поперечной плоскости на угол  $\gamma_{np}$ , являющийся предельным по условию устойчивости положения в поперечной плоскости.

$$\gamma_{np} = \alpha - \beta, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - угол поперечной статической устойчивости колесной машины,

$$\alpha = \arctg \frac{B}{2h}, \quad (2)$$

где  $B$  – колея машины ( поперечная колесная база);

$h$  - высота центра масс машины;

$\beta$  - угол поперечного уклона дороги.

Таким образом, при появлении углового возмущения  $\gamma_s$  в поперечной плоскости ( $(\gamma_s \geq \gamma_{np})$ ) линия действия силы тяжести  $G$  будет проходить левее оси  $OZ$  и момент стабилизирующей от силы тяжести  $G$  станет опрокидывающим. Машина теряет устойчивость положения и опрокинется даже при исчезновении возмущающих воздействий. Таким образом,  $\gamma_{np}$  является предельным угловым кинематическим возмущением при превышении которого теряется устойчивость. Очевидно, что в

случае использования различных систем автоматической динамической стабилизации положения машины необходимо определить параметры возмущенного движения остова в поперечной плоскости на более ранней стадии появления последнего. В этом случае целесообразно определять в качестве возмущений угловые скорость и ускорение остова машины в поперечной плоскости.

*Оценка поперечной устойчивости положения машины методом парциальных ускорений.* Предельное энергетическое возмущение, превышение которого определяет потерю боковой устойчивости положения, определяется увеличением потенциальной энергии машины при переходе центра масс машины из точки  $C$  в точку  $C'$ , лежащую на вертикальной оси  $OZ$  (рис.1).

$$\Delta W_n = G \cdot \Delta h = mg\Delta h, \quad (3)$$

где  $G$  – общая сила тяжести машины;

$m$  – общая масса машины;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$\Delta h$  – вертикальное (вдоль оси  $OZ$ ) перемещение центра масс машины при ее угловом перемещении.

$$\Delta h = (\overline{OC})(1 - \cos \gamma_{np}), \quad (4)$$

Из рис. 1 определим

$$(\overline{OC}) = \sqrt{h^2 + \frac{B^2}{4}} = h\sqrt{1 + \frac{B^2}{4h^2}} = h\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} = h \cdot \sec \alpha. \quad (5)$$

Таким образом, подставляя выражение (4) в уравнение (3), получим с учетом (1) и (5)

$$\Delta W_n = m \cdot g \cdot h \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha}. \quad (6)$$

Выражение (6) определяет минимальную величину бокового энергетического возмущения, приводящую к боковому опрокидыванию колесной машины.

Представляет интерес определение на ранней стадии возмущенного движения по величине возмущающего ускорения и длительности его действия условия сохранения машиной поперечной устойчивости положения. Для этого используем метод парциальных ускорений [6]. Уравнение динамики поворота остова машины в поперечной плоскости имеет вид

$$I_0 \dot{\omega}_x = M_{возм} - M_{стб}, \quad (7)$$

где  $\dot{\omega}_x$  – угловое ускорение остова в поперечной плоскости при возмущенном движении;

$I_0$  – момент инерции машины относительно оси опрокидывания (ось  $OX$ ),

$$I_0 = I_{zc} + m(\overline{OC})^2; \quad (8)$$

где  $I_{zc}$  - центральный момент инерции остова машины,

$$I_{zc} = m \cdot i_x^2, \quad (9)$$

где  $i_x$  - радиус инерции машины относительно оси ОХ;

$M_{воз}$  - возмущающий момент;

$\dot{I}_{стаб}$  - стабилизирующий момент.

Разделив левую и правую части уравнения (7) на  $I_0$ , получим

$$\dot{w}_x = \dot{w}_x^{ПВ} + \dot{w}_x^{ПС}, \quad (10)$$

где  $\dot{w}_x^{ПВ}; \dot{w}_x^{ПС}$  - парциальное возмущение и стабилизирующее угловые ускорения:

$$\dot{w}_x^{ПВ} = \frac{M_{воз}}{I_0} \quad (11)$$

$$\dot{w}_x^{ПС} = \frac{M_{стаб}}{I_0} \quad (12)$$

При равенстве нулю суммы парциальных ускорений  $\dot{w}_x^{ПВ}$  и  $\dot{w}_x^{ПС}$  возмущенное движение не появится. В этом случае машина обладает устойчивостью против опрокидывания или статической устойчивостью.

Определим парциальное стабилизирующее ускорение (см. рис.1) через стабилизирующий момент.

$$M_{стаб} = G(\overline{OC}) \sin(\gamma_{np} - \gamma) = mgh \frac{\sin(\alpha - \beta - \gamma)}{\cos \alpha}, \quad (13)$$

где  $\gamma$  - угол поворота остова машины в поперечной плоскости.

Тогда выражение (12) после подстановки в него уравнений (5), (8), (9) и (13) примет вид

$$\dot{w}_x^{ПС} = -\frac{g}{h} \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta - \gamma)}{\frac{i_x^2}{h^2} + \sec^2 \alpha}. \quad (14)$$

Начальное парциальное стабилизирующее ускорение находим при  $\gamma = 0$

$$\dot{w}_x^{ПС} = -\frac{g}{h} \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\frac{i_x^2}{h^2} + \sec^2 \alpha}. \quad (15)$$

С увеличением  $\gamma$  происходит уменьшение  $\dot{w}_x^{ПС}$  и при  $\gamma = \gamma_{np}$  (см. соотношение (1)) величина  $\dot{w}_x^{ПС}$  равна нулю. При  $\gamma > \gamma_{np}$  указанное ускорение меняет свой знак на противоположный, т.е. становится возмущающим парциальным ускорением от силы тяжести машины.

Пусть нам известно возмущающее парциальное ускорение  $\dot{w}_x^{\Pi B}$  ( $t$ ) и время его действия ( $t_b$ ). Парциальная угловая скорость, созданная действием парциального возмущающего ускорения  $\dot{w}_x^{\Pi B}$  ( $t$ ) в течение времени ( $t_b$ )

$$w_x^{\Pi B} = \int_0^{t_b} \dot{w}_x^{\Pi B}(t) G t dt. \quad (16)$$

Кинетическая энергия возмущающего воздействия

$$W_{K.B} = I_0 \frac{(w_x^{\Pi B})^2}{2}, \quad (17)$$

должна быть меньше или равна предельного энергетического возмущения  $\Delta W_{\Pi}$ , т.е.

$$I_0 \frac{(w_x^{\Pi B})^2}{2} \leq mgh \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha}. \quad (18)$$

Из выражения (18) с учетом (8) и (9) определим условие сохранения динамической поперечной устойчивости положения машин

$$w_x^{\Pi B} \leq \sqrt{\frac{2g}{h} \cdot \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\frac{i_x^2}{h^2} \cos \alpha + \sec \alpha}}. \quad (19)$$

Условием появления возмущающего движения является (см. соотношение (10))  $\dot{w}_x > 0$  или

$$\dot{w}_{x0}^{\Pi B} + \dot{w}_{x0}^{\Pi C} > 0, \quad (20)$$

или с учетом соотношения (14) при  $\gamma = 0$

$$\dot{w}_{x0}^{\Pi B} > \frac{g}{h} \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\frac{i_x^2}{h^2} + \sec^2 \alpha}. \quad (21)$$

Условием сохранения статической устойчивости является

$$\dot{w}_{x0}^{\Pi B} \leq \frac{g}{h} \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\frac{i_x^2}{h^2} + \sec^2 \alpha}. \quad (22)$$

Если предположить, что

$$\dot{w}_x^{\Pi B}(t) = \dot{w}_{x0}^{\Pi B} = const, \quad (23)$$

то выражение (16) примет вид

$$w_x^{\Pi B}(t) = \dot{w}_{x0}^{\Pi B} \cdot t_b. \quad (24)$$

С учетом (24) выражение (19) примет вид

$$w_x^{\Pi B} \cdot t_b \leq \sqrt{\frac{2g}{h} \cdot \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\frac{i_x^2}{h^2} \cos \alpha + \sec \alpha}}. \quad (25)$$

Выражение (25) определяет условие сохранения колёсной машиной поперечной динамической устойчивости положения.

*Выводы.*

1. Проведенный анализ позволил классифицировать возмущения, действующие на колесные машины, на кинематические, динамические (силовые) и энергитические. Оценка устойчивости объекта по величине начального возмущающего ускорения позволяет на ранней стадии возмущенного движения провести динамическую стабилизацию поперечной устойчивости положения.

2. С использованием предложенного метода парциальных ускорений определены предельные по условию сохранения поперечной динамической и статической устойчивости положения величины энергитических и кинематических возмущений.

3. Использование метода парциальных ускорений позволяет в дальнейшем аналогично производить оценку продольной статической и динамической устойчивости положения.

#### Литература

1. *Джонс И.С.* Влияние параметров автомобиля на дорожно-транспортные происшествия / *И.С.Джонс.* – М. : Машиностроение, 1979. – 207 с.
2. *Подригало М.А.* Маневренность и тормозные свойства колесных машин / *М.А. Подригало, В.П. Волков, В.И. Курчатый, А.Л. Бобошко* / Харьков: ХНАДУ, 2003.– 403 с.
3. *Меркин Д.Р.* Введение в теорию устойчивости движения / *Д.Р. Меркин.* – М.: Наука, 1976.– 320 с.
4. *Ляпунов А.М.* Общая задача об устойчивости движения. Собрание сочинений/ *А.М. Ляпунов.* – Т.2. – М.–Л. : Изд-во АН СССР, 1956. – 384 с.
5. *Александров Є.Є.* Автоматичне керування рухомими об'єктами і технічними процесами / *Є.Є.Александров, Є.П. Козлов, Б.І. Кузнецов* // Теорія автоматичного керування. Том 1 / [Під ред. Є.Є. Александрова].– Харків: НТУ «ХПУ», 2002. – 420 с.
6. *Артемов М.П.* Метод парціальних прискорень і його застосування при дослідженні динаміки мобільних машин / *М.П. Артемов, А.Т. Лебедев, О.П. Алексеев, В.П. Волков, М.А. Подригало, О.С. Полянський* // Зб. тез доповідей науково-практичної конференції «Наукове забезпечення службово-бойової діяльності внутрішніх військ МВС України». – Харків: акад. внутр. військ МВС України, 2010. – С. 44–46.

### **ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ПОЛОЖЕННЯ КОЛІСНИХ МАШИН МЕТОДОМ ПАРЦІАЛЬНИХ ПРИСКОРЕНЬ**



Подригало М.А., Полянський А.С., Клец Д.М.,  
Корчан М.С., Задорожня В.В.

***Анотація*** – у статті розглянуто задачі збереження стійкості колісної машини з використанням методу парціальних прискорень.

**ASSESSMENT OF THE LOCATION STABILITY OF  
VEHICLES BASED ON THE PARTIAL ACCELERATION  
TECHNIQUE**

M. Podrigalo, A. Polyansky, D. Klets,  
N. Korchan, V. Zaddorozhnya

***Summary***

**Problems of saving of the vehicle stability are considered with using of the partial acceleration technique.**